

## Структурний аналіз територіальних транспортних систем на основі методів класифікації

М. Е. Слободянюк, О. М. Горобченко

*Від вирішення проблеми формування раціональної структури територіальних транспортних систем і їх ефективного розвитку в значній мірі залежить розвиток промислових зон, районів і цілих регіонів. Особливості функціонування територіальних транспортних систем тісно пов'язані з їх структурою, яка характеризується деякою комбінацією парних показників близькості. Функціонування таких систем тісно пов'язане зі своїми структурою. Структура будь-якої транспортної системи є багаторівневою. Для уточнення числа структурних рівнів системи та складових їх елементів розроблені критерії й алгоритми, що дозволяють визначати взаємне розташування зазначених множин на площині з урахуванням можливого їхнього перекриття. Розроблений узагальнений показник близькості декількох множин, що не перекриваються, заснований на обліку парних показників близькості окремих множин і рівний їхньому середньому квадратичному значенню. Процедура структурного аналізу транспортної системи пов'язана з необхідністю попереднього визначення її структурного індексу за результатами розрахунків значень парних показників близькості. Розроблено метод встановлення числа структурних рівнів міжрегіональної транспортної системи заснований на попередньому визначенні структурного індексу системи з наступним прийняттям рішень по об'єднанню множин, що перекриваються, при їхній наявності. Рішення практичних завдань, пов'язаних з уточненням структури, складу й режимів функціонування транспортних систем слід виконувати на основі попередньо встановлюваного структурного індексу. Результати дослідження дозволяють структурувати транспортні системи з виділенням окремих рівнів, диференціювати витрати на їх розвиток та експлуатацію з метою оптимізації їх властивостей*

*Ключові слова:* транспортна система, структурний аналіз, структурний індекс, структурний рівень, алгоритм структурування

### 1. Вступ

Виробнича діяльність промислових підприємств різного профілю пов'язана з необхідністю здійснення вантажних перевезень при доставці сировини, матеріалів, напівфабрикатів, готової продукції. Для задоволення потреб у перевезеннях створюються транспортні системи й уся необхідна територіальна інфраструктура. Формування і розвиток таких систем тісно пов'язано з особливостями та обсягами регіонального виробництва, наявністю стійких транспортних зв'язків між підприємствами, а також перспективами подальшого розвитку промислових зон і територій [1].

Транспортна система являє собою транспортну мережу забезпечену інфраструктурою, яка, в свою чергу, для кожного виду транспорту має множину елементів, що сприяють і забезпечують пропуск матеріальних потоків. Дані дослідження стосуються розвитку методу оптимізації структури транспортної мережі з метою поділу її рівні за критерієм завантаженості і використання, а в подальшому розподілу капітальних і поточних витрат на розвиток і експлуатацію інфраструктури.

Задачі формування раціональної структури транспортної системи та підвищення ефективності її роботи в поточних умовах є досить актуальними. Спектр шляхів вирішення цих завдань достатньо широкий, від застосування інтелектуальних систем керування [2–4], до розробки нових моделей та методів організації роботи та експлуатації транспортних засобів [5, 6]. Зв'язане це з тим, що будівництво транспортних комунікацій, об'єктів інфраструктури, їх ремонт і підтримка в працездатному стані в цілому є досить витратними. З експлуатаційної точки зору використовувана територіальна транспортна система являє собою сукупність транспортних шляхів, вузлів, складських комплексів, розподільних центрів та інших елементів інфраструктури. Це забезпечує можливість ефективного просування транспортних і матеріальних потоків при здійсненні функціонуючими підприємствами виробничо-господарської діяльності.

Слід зазначити, що незважаючи на наявність відомих методів моделювання, немає достатнього простого і доступного для розуміння і використання на практиці базового методу структурування транспортних систем, що дозволяє вже на початковому етапі проектування закладати елементи підвищують їх ефективності, яка і проявиться в експлуатації. Це так само прямо або побічно підтверджується в роботах, що проаналізовано нижче. Тому аналіз структури транспортних систем як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації, наведено в контексті підвищення ефективності транспортних систем, як одного з найбільш важливих факторів.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Прийняття обґрунтованих проектних рішень пов'язаних з формуванням транспортної мережі, реконструкцією діючих ділянок, удосконаленням існуючих розв'язок і інших елементів інфраструктури повинно бути узгоджено із загальною концепцією збалансованого регіонального розвитку [7]. При цьому слід мати на увазі, що виробничі зв'язки між окремими суб'єктами господарювання формуються, як правило, на місцевому рівні і саме на цьому рівні виникають довгострокові транспортні зв'язки.

Є декілька підходів до аналізу та оцінки ефективності транспортних систем [8, 9]. У статті [10] пропонується постановка задач, змодельованих стаціонарними рівняннями Колмогорова-Феллера, з нелінійним коефіцієнтом дрейфу. Наведено математичний аналіз моделі. Основою запропонованого способу є застосування перетворення Фур'є для отримання аналітичних рішень розглянутих проблем. Проблеми, які обговорюються у дослідженні [11], пов'язані з оцінкою функціонування складних технічних систем, зокрема, транспортних систем. Передбачалося, що оцінка їх функціонування залежить від ступеня виконання обраних

критеріїв. Тому важливо визначити набір критеріїв, включаючи їх тип, кількість та значення. Таким чином, вибір та визначення важливості значущих змінних у часі, вимірюваних та незалежних характеристик, визначають ступінь виконання критеріїв, які слугують основою для оцінки функціонування таких систем.

У роботі [12] отримано модель DEA на основі нечіткої теорії для оцінки ефективності транспортних систем та послуг з урахуванням невизначеності даних, а також результатів оцінки. Зокрема, приділено увагу "часу затримки", який є важливою вхідною інформацією, яку зазвичай неможливо виміряти, і надалі цей параметр вважається невизначеним. У дослідженні [13] розглядаються проблеми, пов'язані із забезпеченням якості транспортних систем. Була визначена концепція якості роботи системи, на основі якої було розроблено схематичну модель оцінки та описано випадковий процес, який буде використаний для її оцінки. Розроблена модель оцінки ефективності експлуатації системи для аналізованих технічних об'єктів із використанням напівмарківської теорії. Але залишилось не висвітленим питання розробки показника, за яким можливо оцінити та порівняти різні транспортні системи.

В роботі [14] територіальні транспортні системи, що функціонують у встановлених межах, розглядаються як сукупність джерел і споживачів транспортних потоків, взаємодія між якими відбувається на базі єдиної транспортної мережі з метою задоволення існуючих потреб у вантажних перевезеннях. При цьому важливо, щоб структура системи в цілому була раціональною, відповідала існуючим потребам і перспективам збалансованого регіонального розвитку. В роботах [15, 16] також зазначено, що створення і підтримка в робочому стані транспортних систем, їх реконструкція та технічне переоснащення вимагають залучення значних фінансових ресурсів з попередньою оцінкою економічної ефективності. При цьому залишився не визначеним зв'язок між ефективністю системи та її структурою.

Незважаючи на широкий спектр вирішених питань, до тепер існують резерви покращення структурного аналізу та підвищення ефективності експлуатації транспортних систем. Необхідно відзначити, що при таких підходах до аналізу транспортних систем залишається не розкритим питання визначення кількості структурних рівнів складних систем та узагальненого критерію, що характеризує їх структуру.

Основними критеріями оцінки ефективності функціонування транспортних систем є час і витрати. Очевидним є зв'язок структури транспортної системи та її окремих елементів (протяжність шляхів, навантаженість, час руху, інфраструктура, експлуатаційні витрати та ін.) до зазначених критеріїв. Це прямо і побічно підтверджується в роботах [7–13].

В цілому, можна сказати, що ефективність функціонування територіальної транспортної системи пов'язана з особливостями процесу взаємодії окремих підсистем, структурних елементів та характеристик використаних на практиці логістичних операцій, процесів та технологій.

Сучасні методи аналізу та оптимізації параметрів процесу функціонування територіальних транспортних систем направлені на удосконалення існуючих і розробку нових технологій взаємодії структурних елементів [17]. При цьому

технології, операції і процеси, що застосовуються, повинні бути адаптовані до існуючої структури системи [18]. Однак в технічній літературі відсутній системний аналіз різних структур та властивостей транспортних систем, побудованих на їх підставі. Класифікація структурних елементів, по суті, є формальною та в ряді випадків не дозволяє об'єктивно оцінювати їх роль та виробничий потенціал у масштабі всієї транспортної системи.

В теперішній час питання структурного аналізу та синтезу територіальних транспортних систем в повній мірі не пропрацьовано, що створює деякі складнощі як при оцінці функціонування діючих, так і при проектуванні нових систем.

### **3. Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є розробка алгоритму проведення аналізу структури регіональних транспортних систем з використанням методу декомпозиції і системної інтеграції на підставі структурних індексів, що дозволяє при вирішенні конкретних завдань прийняти рішення по уточненню їх структури, складу та режимів функціонування.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- розробити метод декомпозиції транспортної системи для виділення різних рівнів і розробити критерії які їх характеризують;
- розробити метод визначення структурного індексу з використання системної інтеграції;
- розробити метод встановлення числа структурних рівнів міжрегіональної транспортної системи.

### **4. Декомпозиція транспортної системи для виділення різних рівнів**

Аналіз структури та декомпозиція територіальних транспортних систем виконується для визначення складу, властивостей, характеру й особливостей взаємодії окремих елементів у процесі функціонування. Це дозволяє дати оцінку пристосованості таких систем до рішення завдань, обумовлених їхнім цільовим призначенням.

Перелік типових завдань, виникаючих при формуванні й організації функціонування територіальних транспортних систем [19–21] наведено у табл. 1.

Рішення перерахованих завдань на різних етапах проектування, експлуатації, реконструкції й розвитку систем обумовлює необхідність періодичної оцінки їх поточного стану й обґрунтування доцільності прийняття конкретних управлінських рішень.

Структура транспортної системи в загальному випадку може складатися із трьох взаємозалежних рівнів, що відрізняються своїм складом і функціями, що виконуються [22]. Однак кількість структурних рівнів може бути й менше трьох, а відомі методи структурного аналізу не дозволяють однозначно встановити їхню кількість і склад. Це створює складності при розв'язку практичних завдань, зв'язаних у тому числі, і з вибором оптимальних режимів функціонування.

Розглянемо, як приклад, фрагмент територіальної транспортної системи, показаний на рис. 1.

Таблиця 1

Типові завдання, що виникають при розробці й організації функціонування територіальних транспортних систем

Перелік завдань по формуванню структури й організації функціонування транспортних систем	Відповідний етап проектування або функціонування пов'язаний з рішенням поставленого завдання
Завдання аналізу й визначення відповідності структури наявної транспортної системи потребам регіонів, пов'язаним зі здійсненням вантажних перевезень	Вирішується на етапі номінальної експлуатації системи для оцінки можливості й доцільності оптимізації режимів її функціонування на різних рівнях
Завдання синтезу й оптимізації структури багаторівневих транспортних систем з урахуванням планованих потреб в організації перевезень	Вирішується на етапі проектування й формування структури транспортної мережі при освоєнні нових територій і регіонів
Завдання прийняття рішень пов'язаних з поступовим (еволюційним) розвитком територіальних транспортних систем і приведення відповідності їх структури й стану мінливим потребам у здійсненні місцевих, регіональних і міжрегіональних перевезень	Вирішується на етапі реконструкції, модернізації, удосконалювання й розвитку діючих транспортних систем

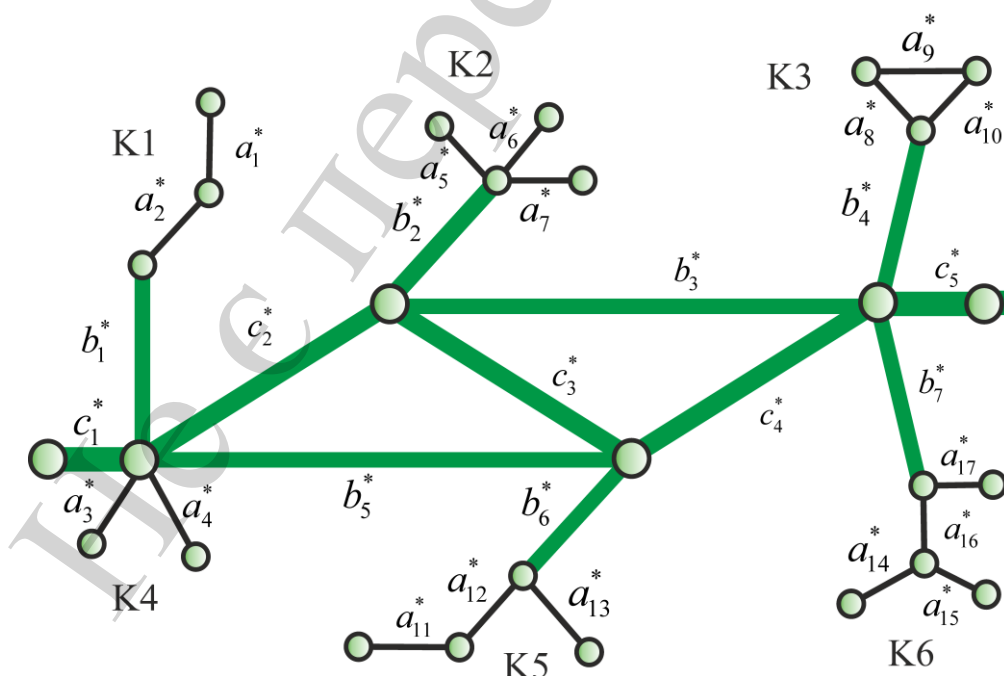


Рис. 1. Фрагмент територіальної транспортної системи

До його складу входять шість взаємодіючих кластерів K1, K2, ... K6, кожний з яких містить транспортні шляхи, різної довжини.

Сукупність шляхів таких ділянок утворює склад місцевого рівня системи. Для фрагмента, показаного на рис. 1, лінійні елементи місцевого рівня позначаються  $a_i^*$  ( $i=1, 2, \dots, 17$ ) і становлять множину  $A^*$ .

У свою чергу лінійними елементами системи є й шляхи, що з'єднують між собою вузли окремих кластерів, з утворенням єдиної транспортної мережі на регіональному рівні. Ці ділянки на рис. 1 позначаються  $b_i^*$  ( $i=1, 2, \dots, 7$ ), а їх сукупність визначає склад множини  $B^*$ .

Крім того, у складі системи є й елементи, що забезпечують проходження транзитних вантажопотоків, які позначаються  $c_i^*$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ), а їх сукупність утворює множину  $C^*$  і визначає склад міжрегіонального рівня системи (рис. 1).

Таким чином, можна укласти, що кожна з ділянок мережі, як елемент транспортної системи характеризується приналежністю до певного структурного рівня, фактичною довжиною транспортного шляху й сумарною величиною вантажопотоку у двох протилежних напрямках.

В табл. 2 наведено дані, що характеризують склад аналізованої системи.

На рис. 2 показане взаємне розташування на площині  $qO_l$  елементів, що належать множинам  $A^*$ ,  $B^*$  і  $C^*$ .

Однак використання спостережуваних значень вантажопотоків  $q$  (т/діб) і відстаней  $l$  (км) із зазначеною розмірністю, при графічному відображенні структури системи показаної на рис. 2 недостатньо інформативно. Зв'язане це з тим, що при описі властивостей систем кращим виявляється використання безрозмірних показників. Тому надалі замість вихідних множин  $A^*$ ,  $B^*$  і  $C^*$  з наборами елементів  $a_i^*(l_i^{A^*}, q_i^{A^*})$ ,  $b_i^*(l_i^{B^*}, q_i^{B^*})$ ,  $c_i^*(l_i^{C^*}, q_i^{C^*})$  використовуються перетворені множини  $A$ ,  $B$  і  $C$  з елементами  $a_i(x_i^A, y_i^A)$ ,  $b_i(x_i^B, y_i^B)$ ,  $c_i(x_i^C, y_i^C)$  безрозмірні координати яких визначаються так:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i^A = \frac{l_i^{A^*} - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \\ y_i^A = \frac{q_i^{A^*} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} x_i^B = \frac{l_i^{B^*} - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \\ y_i^B = \frac{q_i^{B^*} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} x_i^C = \frac{l_i^{C^*} - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \\ y_i^C = \frac{q_i^{C^*} - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \end{array} \right\}; \quad (1)$$

де  $l_{\max}$  – максимальне значення довжини транспортної ділянки серед усіх елементів  $l_i^{A^*}$ ,  $l_i^{B^*}$ ,  $l_i^{C^*}$ ;  $l_{\min}$  – відповідно мінімальне значення;  $q_{\max}$  – максимальна величина вантажопотоку, серед усіх елементів  $q_i^{A^*}$ ,  $q_i^{B^*}$ ,  $q_i^{C^*}$ ;  $q_{\min}$  – відповідно мінімальне значення вантажопотоку.

Елементи множини « $A$ » описані атрибутами «відстань», тому що на цій ділянці цілком визначеними і стійкими можуть бути тільки відстані, а вантажопотоки носять стохастичний характер.

Таблиця 2

Характеристики територіальної транспортної системи

Позначення мно- жин і окремих елементів у їхньо- му складі	Характеристики елементів транспортної системи		
	Рівень системи й порядковий но- мер елемента, $i$	Довжина діля- нки, км	Величина загального вантажопотоку, т/добу
1	2	3	4
$A^*$	<i>місцевий</i>	$l_i^{A^*}$	$q_i^{A^*}$
$a_1^*$	1	23	6110
$a_2^*$	2	18	4960
$a_3^*$	3	31	5740
$a_4^*$	4	17	6600
$a_5^*$	5	27	4140
$a_6^*$	6	36	5120
$a_7^*$	7	32	7220
$a_8^*$	8	31	7740
$a_9^*$	9	24	7910
$a_{10}^*$	10	26	8800
$a_{11}^*$	11	18	7140
$a_{12}^*$	12	25	9300
$a_{13}^*$	13	34	10140
$a_{14}^*$	14	22	6840
$a_{15}^*$	15	31	10200
$a_{16}^*$	16	29	11220
$a_{17}^*$	17	32	11140
$B^*$	<i>регіональний</i>	$l_i^{B^*}$	$q_i^{B^*}$
$b_1^*$	1	33	8100
$b_2^*$	2	44	8850
$b_3^*$	3	61	8260
$b_4^*$	4	34	10920
$b_5^*$	5	45	7760
$b_6^*$	6	42	10650
$b_7^*$	7	46	9730
$C^*$	<i>міжрегіональний</i>	$l_i^{C^*}$	$q_i^{C^*}$

## Закінчення Таблиці 2

1	2	3	4
$c_1^*$	1	67	27200
$c_2^*$	2	36	26650
$c_3^*$	3	30	24150
$c_4^*$	4	59	23950
$c_5^*$	5	63	26340

Множини  $B$  і  $C$  прогнозовані і носять більш стійкий характер, тому ними можна оперувати. Вони адекватно характеризують і описують завантаження й функціонування транспортних систем і через відстані мають зв'язок з безліччю « $A$ ». В принципі, для структурування транспортної системи можуть бути використані і інші (фактори) які мають певний стійкий зв'язок між собою (наприклад питомі витрати в множині « $A$ » і обсяги перевезень виражені в вартісних показниках у множинах  $B$  і  $C$ ).

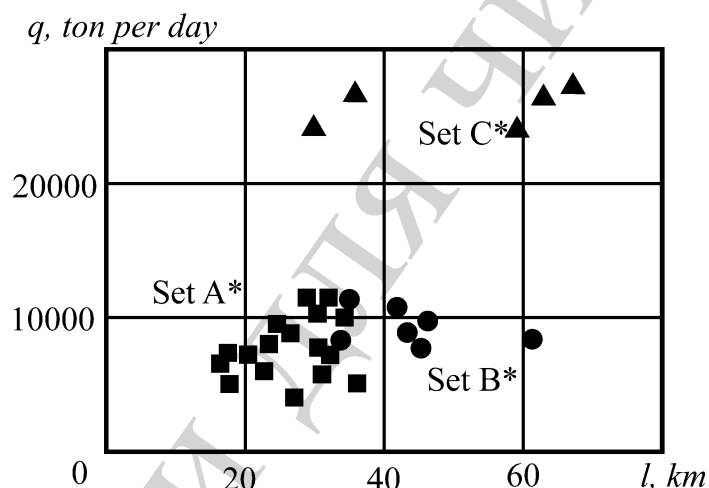


Рис. 2. Характеристики елементів транспортної системи у вигляді сукупності точок на площині  $qOl$  ( $q$  – вантажопотік;  $l$  – довжина транспортної ділянки)

Територіальну систему слід вважати трирівневою, у тому випадку, якщо точкові елементи  $ai$ ,  $bi$ ,  $ci$  приналежні різним рівням утворюють на площині  $YOX$  множини, що не перекриваються,  $A$ ,  $B$  і  $C$ . Структурний аналіз такої системи пов'язаний з визначенням взаємного розташування на площині  $YOX$  точок приналежних множинам  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , з наступною оцінкою можливості об'єднання множин, що перекриваються, при їхній наявності.

Таким чином, для уточнення числа структурних рівнів системи й складових їх елементів повинні бути розроблені критерії й алгоритми, що дозволяють визначати взаємне розташування зазначених множин на площині. Причому ці критерії повинні враховувати можливе перекриття та оцінку необхідності подальшого об'єднання множин, що перекриваються.



Реалізація процедури оцінки взаємної близькості множин, що характеризують структуру транспортної системи, є важливим етапом аналізу, результати якого багато в чому будуть визначати подальші дії, пов'язані з необхідністю об'єднання множин, що перекриваються.

## 5. Розробка методу встановлення числа структурних рівнів міжрегіональної транспортної системи

Поняття відстані між групами однорідних об'єктів звичайно використовується при розробці процедури їх класифікації й пов'язане з оцінкою взаємного розташування на площині множин різної природи [23]. При цьому характеристикою близькості окремих множин може служити відстань, обумовлена за принципом «близького сусіда», з використанням потенційних функцій і т. п.

Оскільки центр окремої множини визначається положенням його центроїда на площині  $YOX$ , то надалі відстань між множинами  $A$  і  $B$  (рис. 3), які містять відповідно  $N_A$  і  $N_B$  елементів, визначається як евклідова між центроїдами  $S_A$  і  $S_B$ :

$$D_{AB} = \sqrt{(\bar{x}_A - \bar{x}_B)^2 + (\bar{y}_A - \bar{y}_B)^2} = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^{N_A} x_i^A}{N_A} - \frac{\sum_{i=1}^{N_B} x_i^B}{N_B} \right)^2 + \left( \frac{\sum_{i=1}^{N_A} y_i^A}{N_A} - \frac{\sum_{i=1}^{N_B} y_i^B}{N_B} \right)^2}. \quad (2)$$

Модель (2) і її елементи описані в [16], а саме:

- $\bar{x}_A$  та  $\bar{y}_A$  – координати центру центроїда  $S_A$ ;
- $\bar{x}_B$  та  $\bar{y}_B$  – координати центру центроїда  $S_B$ ;
- $N_A$  та  $N_B$  – кількість точок, що входять до центроїдів;
- $x_i^A$ ,  $y_i^A$ ,  $x_i^B$ ,  $y_i^B$  – координати точок всередині центроїдів.

Якщо множини  $A$  і  $B$  характеризуються значеннями відповідних діаметрів  $D_A$  і  $D_B$ , то надалі такі множини оцінюються, як такі, що не перекриваються, при виконанні нерівності [24]:

$$D_{AB} < \frac{D_A}{2} + \frac{D_B}{2}.$$

Або, після перетворень:

$$\eta_{AB} = 1 - \frac{D_A + D_B}{2D_{AB}} > 0.$$

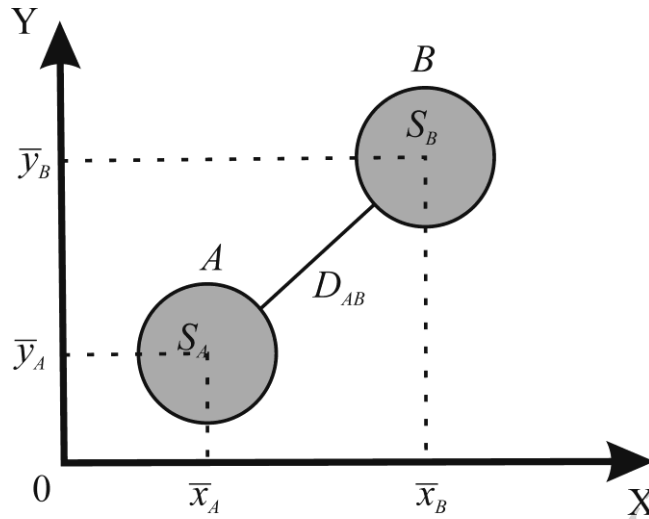


Рис. 3. Схема визначення евклідової відстані між множинами  $A$  і  $B$  на площині  $YOX$

У цьому випадку критерій  $\eta_{AB}$  слід розглядати як показник парної близькості множин  $A$  і  $B$  [25]. Він приймає позитивні значення в тих випадках, коли елементи розглянутих множин віддалені на площині  $YOX$  настільки, що області обмежені відповідними діаметрами  $D_A$  і  $D_B$  не перекривають один одного. При цьому поступове взаємне віддалення множин, що не перекриваються,  $A$  і  $B$  буде супроводжуватися і безперервним ростом позитивних значень показника парної близькості  $\eta_{AB}$ .

Якщо ж має місце часткове або повне перекриття зазначених множин на площині, то  $\eta_{AB}$  приймає негативне значення.

Розглянемо тепер випадок, коли на площині  $YOX$  (рис. 4) розташовано три множини  $A$ ,  $B$  і  $C$  із числом елементів  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_C$  і відповідними діаметрами  $D_A$ ,  $D_B$ ,  $D_C$ . Відстань між множинами  $A$  і  $B$  визначається по формулі (2). Аналогічним образом визначаються й відстані між множинами  $B$  і  $C$ , а також  $A$  і  $C$ .

Показники парної близькості для перерахованих множин, що встановлюються відповідно до викладеного підходу й з використанням аналогічних позначень визначаються так:

$$\begin{cases} \eta_{AB} = 1 - \frac{D_A + D_B}{2 \cdot D_{AB}}, \\ \eta_{AC} = 1 - \frac{D_A + D_C}{2 \cdot D_{AC}}, \\ \eta_{BC} = 1 - \frac{D_B + D_C}{2 \cdot D_{BC}}. \end{cases} \quad (3)$$

Аналізовані множини  $A$ ,  $B$  і  $C$  не будуть перекриватися (рис. 5) при виконанні умов:

$$\begin{cases} \eta_{AB} > 0, \\ \eta_{AC} > 0, \\ \eta_{BC} > 0. \end{cases} \quad (4)$$

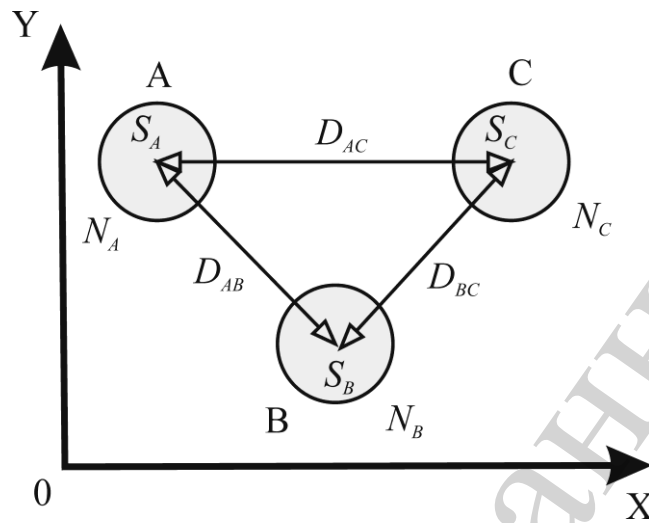


Рис. 4. Взаємне розташування множин  $A, B, C$  на площині і схема визначення відстаней між ними

Відзначимо, що із практичної точки зору найбільший інтерес представляє ситуація, коли аналізована система має три структурні рівні, а множини відповідних точкових елементів на площині  $Y0X$  не перекриваються.

Припустимо, аналізована система є трирівневою, і умова (4) виконується. Оскільки максимальне значення кожного парного показника близькості дорівнює одиниці, то в системі прямокутних координат  $\eta_{AB}, \eta_{AC}, \eta_{BC}$  область можливої зміни радіус-вектора  $\vec{r}$  буде перебувати усередині простору, обмеженого одиничним кубом (рис. 6).

Максимально можливої величини модуль радіус-вектора  $\vec{r}$  досягає в тому випадку, коли точка  $S^*(1, 1, 1)$ , що характеризує взаємне розташування множин збігається з вершиною куба, найвіддаленішої від початку координат:  $|\vec{r}|_{\max} = \sqrt{3}$  (рис. 6)

Таке положення радіус-вектора буде відповідати випадку найбільшого віддалення всіх розглянутих множин, друг від друга. Тоді для оцінки близькості множин, що не перекриваються, слід використовувати узагальнений показник  $\theta$  [24]:

$$\theta = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\eta_{AB}^2 + \eta_{AC}^2 + \eta_{BC}^2}. \quad (5)$$

Використання нормувального множника  $1/\sqrt{3}$  приводить до того, що узагальнений показник близькості може змінюватися в діапазоні значень  $0 \leq \theta \leq 1$ .

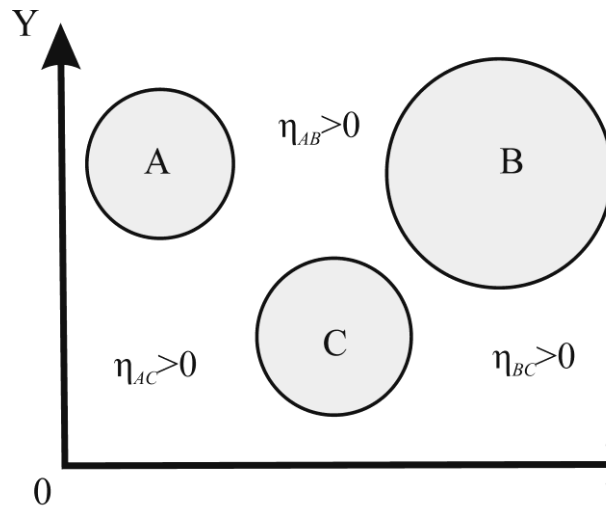


Рис. 5. Взаємне розташування множин  $A$ ,  $B$  і  $C$ , що не перекриваються

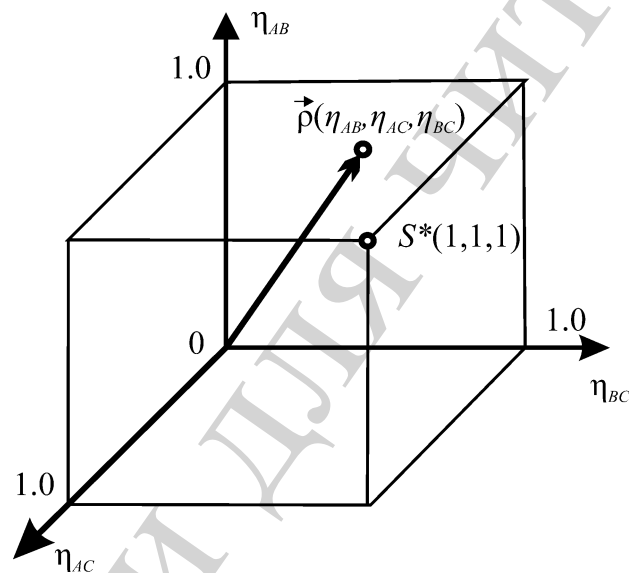


Рис. 6. Положення радіус-вектора  $\vec{\rho}$  в тривимірній системі координат показників парної близькості  $\eta_{AB}$   $\eta_{AC}$   $\eta_{BC}$

Таким чином, можна зробити висновок, що розроблений узагальнений показник близькості декількох множин, що не перекриваються, заснований на обліку парних показників близькості окремих множин і рівний їхньому середньому квадратичному значенню.

Відзначимо також, що у випадку  $\theta = 0$  має місце граничне зближення всіх множин без їхнього взаємного перекриття, а негативні значення узагальнений показник близькості приймає тоді, коли спостерігається часткове або повне перекриття будь-яких з множин  $A$ ,  $B$ ,  $C$  на площині  $YOX$ .

У цілому ж структурні особливості трирівневих транспортних систем будуть явно виражені в тих випадках, коли множини, що не перекриваються, вилучені друг від друга настільки, що величина узагальненого показника близькості перебуває в інтервалі значень  $0,5 < \theta < 1,0$ .

Для виконання розрахунків і оцінки взаємного розташування окремих множин на площині відповідно до запропонованого алгоритму й використання розроблених показників в інтегрованій обчислювальній системі Mathcad складена комп'ютерна програма. Можливості її оцінювалися для різних варіантів взаємного розташування множин  $A$ ,  $B$  і  $C$ .

Так, на рис. 7 показане взаємне положення множин, що не перекриваються, координати окремих елементів яких наведено в табл. 3–5.

Таблиця 3

Координати елементів множини  $A$

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_i$	0,2	0,3	0,275	0,325	0,25	0,35	0,225	0,275	0,325
$y_i$	0,8	0,8	0,775	0,775	0,75	0,75	0,725	0,725	0,725
$i$	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$x_i$	0,2	0,25	0,3	0,35	0,225	0,3	0,25	0,175	0,45
$y_i$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,675	0,675	0,65	0,625	0,7

Таблиця 4

Координати елементів множини  $B$

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_i$	0,551	0,475	0,491	0,595	0,45	0,471	0,485	0,53	0,551	0,555
$y_i$	0,4	0,375	0,375	0,375	0,35	0,35	0,35	0,325	0,3	0,3
$i$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$x_i$	0,493	0,492	0,51	0,385	0,371	0,471	0,477	0,385	0,393	0,385
$y_i$	0,275	0,275	0,25	0,225	0,225	0,2	0,175	0,175	0,15	0,15

Таблиця 5

Координати елементів множини  $C$

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_i$	0,55	0,575	0,65	0,625	0,61	0,671	0,71	0,712	0,615	0,715
$y_i$	0,775	0,755	0,751	0,715	0,72	0,725	0,73	0,665	0,621	0,624

У розглянутому випадку парні показники близькості приймають наступні позитивні значення:

$$\begin{cases} \eta_{AB} = 0,384, \\ \eta_{AC} = 0,302, \\ \eta_{BC} = 0,422. \end{cases}$$

Відповідно значення узагальненого показника близькості:  $\theta = 0,373$ . З рис. 7 видно, що перекриття аналізованих множин не відбувається й, отже, розглянута система є трирівневою.

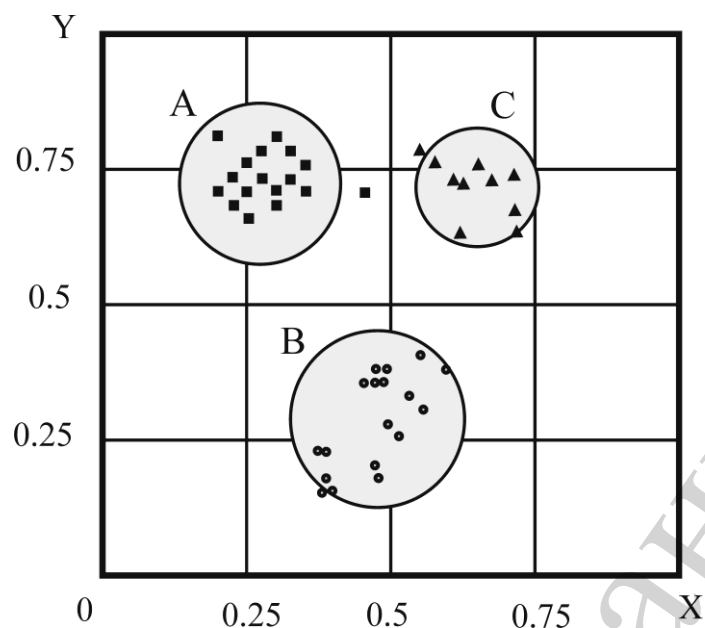


Рис. 7. Взаємне розташування трьох множин, що не перекриваються

У тому випадку, якщо елементи множин  $A$ ,  $B$  і  $C$  характеризуються набором даних представлених у табл. 6–8, то всі перераховані множини будуть перекриватися так, як це показано на рис. 8.

Таблиця 6

Координати елементів множини  $A$

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_i$	0,4	0,5	0,475	0,525	0,45	0,55	0,425	0,475	0,525
$y_i$	0,8	0,8	0,775	0,775	0,75	0,75	0,725	0,725	0,725
$i$	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$x_i$	0,4	0,45	0,5	0,55	0,425	0,5	0,45	0,375	0,65
$y_i$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,675	0,675	0,65	0,625	0,7

Таблиця 7

Координати елементів множини  $B$

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_i$	0,651	0,575	0,591	0,695	0,55	0,571	0,585	0,63	0,651	0,655
$y_i$	0,7	0,675	0,675	0,675	0,65	0,65	0,65	0,625	0,6	0,6
$i$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$x_i$	0,593	0,592	0,61	0,585	0,471	0,471	0,577	0,485	0,493	0,485
$y_i$	0,575	0,575	0,55	0,525	0,525	0,5	0,475	0,475	0,45	0,45

Таблиця 8

Координати елементів множини  $C$

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_i$	0,55	0,575	0,65	0,625	0,61	0,671	0,71	0,712	0,615	0,715
$y_i$	0,775	0,755	0,751	0,715	0,72	0,725	0,73	0,665	0,621	0,624

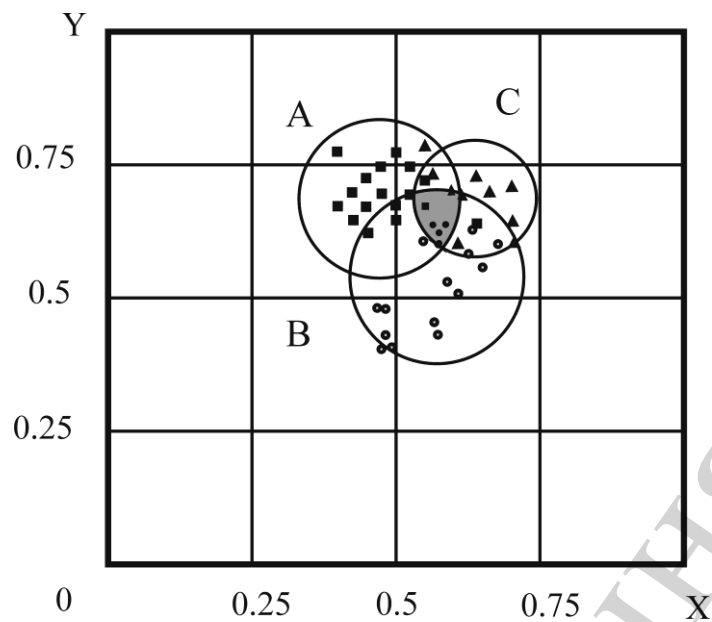


Рис. 8. Взаємне розташування трьох множин, що перекриваються, на площині

Усі значення показників парної близькості будуть у цьому випадку від'ємними:

$$\begin{cases} \eta_{AB} = -0,747 \\ \eta_{AC} = 0,546 \\ \eta_{BC} = 0,835 \end{cases} .$$

Таким чином, розроблені показники й відповідна розрахункова програма для оцінки взаємного розташування множин на площині дозволяють визначати очікувані властивості аналізованих багаторівневих транспортних систем.

## 6. Встановлення числа структурних рівнів транспортної системи

Особливості функціонування територіальних транспортних систем тісно пов'язані з їхньою структурою, яка характеризується деякою комбінацією парних показників близькості. При цьому, як було показано раніше, значення окремих показників  $\eta_{AB}$ ,  $\eta_{AC}$ ,  $\eta_{BC}$  можуть бути як позитивними, так і від'ємними.

Це означає, що в загальному випадку існує вісім варіантів комбінацій знаків парних показників близькості, яким можуть бути поставлені у відповідність різні структурні індекси з умовними позначками  $S1, S2, \dots, S8$ .

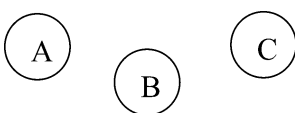
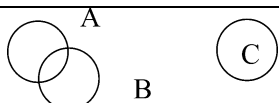
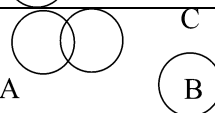
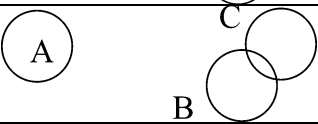
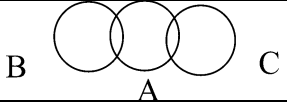
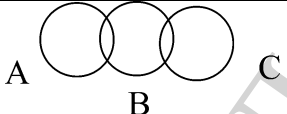
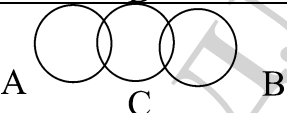
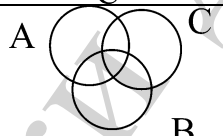
Визначення структурного індексу аналізованої системи, як її найважливішої характеристики, в кожному конкретному випадку слід робити відповідно до даних, представлених у табл. 9.

У цілому можна стверджувати, що структурний індекс є характеристикою сімейства однотипних транспортних систем із близькими властивостями. Можлива різноманітність спостережуваних на практиці структур описується з вико-

ристанням восьми основних варіантів, що відповідають тим або іншим структурним індексам з умовними позначками  $S1, S2, \dots S8$ .

Таблиця 9

Структурні характеристики багаторівневих транспортних систем

Умовна позначка структурного індексу системи	Схема взаємного розташування окремих множин на площині	Знаки парних показників близькості		
		$\eta_{AB}$	$\eta_{AC}$	$\eta_{BC}$
$S1$		+	+	+
$S2$		-	+	+
$S3$		+	-	+
$S4$		+	+	-
$S5$		-	-	+
$S6$		-	+	-
$S7$		+	-	-
$S8$		-	-	-

## 7. Обговорення результатів дослідження теоретичних основ аналізу транспортних систем

Рішення практичних завдань, пов'язаних з уточненням структури, складу й режимів функціонування транспортних систем слід виконувати на основі попередньо встановлюваного структурного індексу.

Таким чином, процедура структурного аналізу транспортної системи пов'язана з необхідністю попереднього визначення її структурного індексу за результатами розрахунків значень парних показників близькості, відповідно до даних, представлених у табл. 9.

Для кожного структурного індексу в табл. 10 наведені дані про можливі варіанти об'єднання множин, що перекриваються, а також інформація з кількості структурних рівнів, відповідних до різних варіантів такого об'єднання.

Тоді, визначення числа структурних рівнів функціонуючої транспортної системи слід робити на основі наступної послідовності дій:



1) після визначення значень парних показників близькості, з урахуванням їх знаків і з використанням даних табл. 9 встановлюється структурний індекс аналізованої системи;

2) у рамках встановленого структурного індексу приймається рішення про те, які з множин, що перекриваються, повинні бути об'єднані, а які слід розглядати, що тільки як частково перекриваються;

3) остаточне рішення по визначенню кількості структурних рівнів аналізованої системи приймається після виконання процедури об'єднання множин, що перекриваються, відповідно до даних, представлених у табл. 10.

Відзначимо, що в процесі розв'язки завдання визначення числа структурних рівнів системи виникає необхідність розробки критеріїв і правил прийняття рішень, пов'язаних з можливим об'єднанням на площині  $Y \times X$  множин, що частково перекриваються.

Таблиця 10

Структурні індекси систем і відповідні їм варіанти формування структури

Умовна позначка структурного індексу системи	Кількість рівнів транспортної системи при виконанні умов пов'язаних із частковим перекриттям і об'єднанням множин структурних елементів			
$S1$	три рівні, якщо множини $A$ , $B$ і $C$ не перекриваються			
$S2$	два рівні при наявності об'єднаної множини $A \& B$	три рівні при частковому перекритті $A$ і $B$		
$S3$	два рівні при наявності об'єднаної множини $A \& C$	три рівні при частковому перекритті $A$ і $C$		
$S4$	два рівні при наявності об'єднаної множини $B \& C$	три рівні при частковому перекритті $B$ і $C$		
$S5$	один рівень при наявності об'єднаної множини $A \& B \& C$	два рівні при наявності об'єднаної множини $A \& B$ і частковому перекритті $A$ і $C$	два рівні при наявності об'єднаної множини $A \& C$ і частковому перекритті $A$ і $B$	три рівні при частковому перекритті $A$ і $B$ , а також $A$ і $C$
$S6$	один рівень при наявності об'єднаної множини $A \& B \& C$	два рівні при наявності об'єднаної множини $A \& B$ і частковому перекритті $B$ і $C$	два рівні при наявності об'єднаної множини $B \& C$ і частковому перекритті $A$ і $B$	три рівні при частковому перекритті $A$ і $B$ , а також $B$ і $C$
$S7$	один рівень при наявності об'єднаної множини $A \& B \& C$	два рівні при наявності об'єднаної множини $A \& C$ і частковому перекритті $C$ і $B$	два рівні при наявності об'єднаної множини $B \& C$ і частковому перекритті $A$ і $C$	три рівні при частковому перекритті $A$ і $C$ , а також $C$ і $B$
$S8$	один рівень при наявності об'єднаної множини $A \& B \& C$			

Розглянемо цю процедуру докладніше. Припустимо, що дві множини  $W$  і  $V$  з діаметрами  $D_W$  і  $D_V$  частково перекриваються. При цьому  $D_W > D_V$ , а величина їх перекриття  $Z > 0$  (рис. 9).

Визначимо коефіцієнти  $K_1$  і  $K_2$ , як безрозмірні відносні величини:

$$K_1 = \frac{D_V}{D_W}, \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{Z}{D_V} = 0,5 + \frac{D_W - 2D_{WV}}{2D_V}. \quad (7)$$

Величина  $Z$  часткового перекриття множин (рис. 9)

$$Z = \frac{D_W + D_V}{2} - D_{WV}. \quad (8)$$

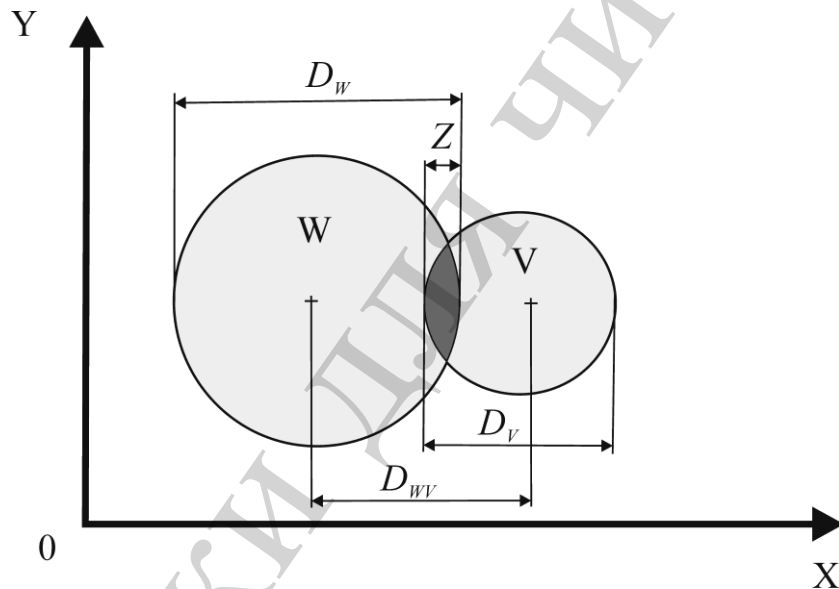


Рис. 9. Взаємне розташування на площині двох множин, що частково перекриваються,  $W$  і  $V$

Оскільки  $D_W > D_V$ , то коефіцієнт  $0 < K_1 < 1$ . Якщо значення  $0 < K_1 < 0,25$ , то через відносно невеликий діаметр множини  $V$  незалежно від величини перекриття  $Z$  можна вважати, що елементи множини  $V$  являє собою «викид», який слід включити до складу основної множини  $W$ .

Аналізуючи можливу зміну коефіцієнта  $K_2$  зі збільшенням перекриття  $Z$ , слід зазначити, що при виконанні умови  $K_2 > 0,5$  центроїд множини  $V$  попадає в границі множини  $W$  обумовлені окружністю діаметром  $D_W$ .

Із цієї причини виконання нерівності  $K_2 > 0,5$  розглядається надалі як достатня підстава для об'єднання множин, що частково перекриваються,  $W$  і  $V$ .

Графічне представлення розробленого алгоритму об'єднання множин, що перекриваються, показано на рис. 10. Для області  $\Omega_1$  значень коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$  множини, що частково перекриваються,  $W$  і  $V$  слід розглядати як існуючі роздільно із частковим «перемішуванням» окремих елементів.

Для області  $\Omega_2$  значень коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$  слід уважати доцільним об'єднання множин  $W$  і  $V$  внаслідок значного перекриття й «перемішування» їх елементів.

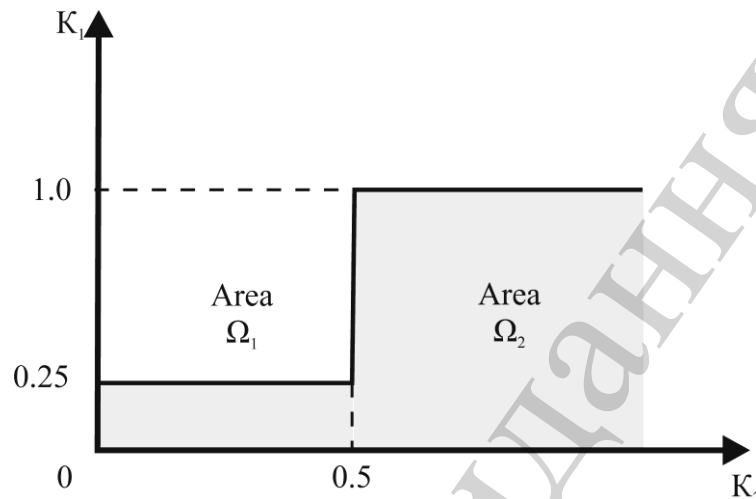


Рис. 10. Області  $\Omega_1$  й  $\Omega_2$  значень коефіцієнтів  $K_1$  і  $K_2$ , для яких приймаються альтернативні рішення по об'єднанню множин, що перекриваються

Таким чином, розроблено метод встановлення числа структурних рівнів міжрегіональної транспортної системи заснований на попередньому визначенні структурного індексу системи з наступним прийняттям рішень по об'єднанню множин, що перекриваються, при їхній наявності.

Використовуючи розроблений метод структурного аналізу відносно системи представлені на рис. 1 можна показати, що незважаючи на часткове перекриття множин  $A$  і  $B$  (рис. 11), об'єднувати їх не слід, оскільки в цьому випадку:  $K_1=0,70$  і  $K_2=0,34$ .

Результати виконаних розрахунків дозволяють зробити висновок, що показана на рис. 1 система характеризується наступним набором параметрів:  $D_{AB}=0,341$ ,  $D_{AC}=0,918$ ,  $D_{BC}=0,73$ ,  $D_A=0,391$ ,  $D_B=0,56$ ,  $D_C=0,752$ ,  $\eta_{AB}= - 0,393$ ,  $\eta_{AC}= 0,378$ ,  $\eta_{BC}=0,101$  і її слід розглядати як трирівневу, зі структурним індексом  $S2$ .

Результати дослідження, що наведені вище, дозволяють отримати нові інструменти для аналізу та характеристики транспортних систем. Але слід вказати на їх деякі недоліки. Зокрема не достатньо визначеним залишилось питання врахування взаємодії різних видів транспорту, час та витрати на перевантаження та зберігання на транзитних складах вантажів. Для вдосконалення функціонування транспортних систем ці фактори необхідно дослідити та урахувати. Саме цьому завданню буде приділена увага в наступних дослідженнях регіональних транспортних систем.

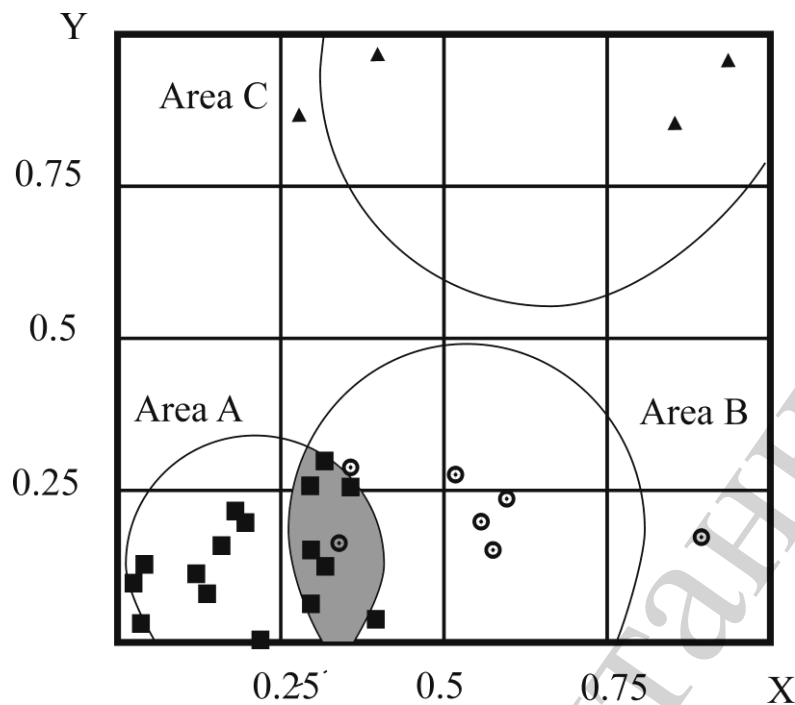


Рис. 11. Взаємне розташування на площині  $YOX$  множин  $A, B, C$  елементів територіальної транспортної системи

## 8. Висновки

1. Розроблений метод декомпозиції транспортної системи для виділення різних рівнів, заснований на логістичних принципах, що дозволяє визначати кількісний склад і характеристики їх окремих рівнів. При цьому доведено, що критерії, за якими оцінюються транспортні системи, тісно пов'язані з їхньою структурою. Структура системи, відповідно до розробленої класифікації, характеризується набором структурних індексів  $S_1, S_2, \dots, S_8$ . Системи з однаковими, індексами й однаковим числом рівнів є структурно-подібними.

2. Запропоновано метод визначення структурного індексу з використання системної інтеграції. Процедура структурного аналізу транспортної системи пов'язана з необхідністю попереднього визначення її структурного індексу за результатами розрахунків значень парних показників близькості. Для кожного структурного індексу наведені дані про можливі варіанти об'єднання множин, що перекриваються, а також інформація з кількості структурних рівнів, відповідних до різних варіантів такого об'єднання.

3. Розроблено метод встановлення числа структурних рівнів міжрегіональної транспортної системи заснований на попередньому визначенні структурного індексу системи з наступним прийняттям рішень по об'єднанню множин, що перекриваються, при їхній наявності. Використання запропонованого методу дозволяє структурувати транспортні системи з виділенням окремих рівнів і диференціювати, в процесі функціонування системи, витрати на розвиток і її експлуатацію.

## Література

1. Rodrigue, J.-P., Comtois, C., Slack, B. (2016). The geography of transport systems. Routledge, 454.

2. Bandyopadhyay, S. (2018). Intelligent Vehicles and Materials Transportation in the Manufacturing Sector. *Advances in Civil and Industrial Engineering*. doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-3064-0>
3. Tartakovskyi, E., Gorobchenko, O., Antonovych, A. (2016). Improving the process of driving a locomotive through the use of decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (3 (83)), 4–11. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.80198>
4. Butko, T., Babanin, A., Gorobchenko, A. (2015). Rationale for the type of the membership function of fuzzy parameters of locomotive intelligent control systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (73)), 4–8. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.35996>
5. Chen, W., Ni, S. (2018). Research on Optimization Technology of Daily Dynamic Train Diagram. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 185–192. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04582-1\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04582-1_22)
6. Gorobchenko, O., Fomin, O., Fomin, V., Kovalenko, V. (2018). Study of the influence of electric transmission parameters on the efficiency of freight rolling stock of direct current. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3 (91)), 60–67. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.121713>
7. Wang, J. E. et. al. (2018). Theory and methodology of transportation development and location measures. *Acta Geogr. Sin.*, 73, 666–676.
8. Van Geenhuizen, M., Rietveld, P. (2016). Policy analysis of transport networks. Routledge, 332. doi: <https://doi.org/10.4324/9781315601113>
9. Patriksson, M. (2015). The traffic assignment problem: models and methods. Dover Publications, 240.
10. Zhilenkov, A., Firsov, A. (2019). Mathematical analysis of transport systems modeled by the stationary Kolmogorov-Feller equation with a nonlinear drift coefficient. *Vibroengineering PROCEDIA*, 25, 166–170. doi: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.20795>
11. Muślewski, Ł., Knopik, L., Landowski, B., Polishchuk, O. (2018). Analysis of assessment criteria for selected systems of transport means operation. *MATEC Web of Conferences*, 182, 02003. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818202003>
12. Bray, S., Caggiani, L., Ottomanelli, M. (2015). Measuring Transport Systems Efficiency Under Uncertainty by Fuzzy Sets Theory Based Data Envelopment Analysis: Theoretical and Practical Comparison with Traditional DEA Model. *Transportation Research Procedia*, 5, 186–200. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.01.005>
13. Muślewski, Ł., Lewalski, M., Migawa, K. (2015). Analysis of a Selected Transport System Operation Efficiency With the Use of Semi-Markov Model / Efektywnościowa Analiza Jakości Działania Wybranego Systemu Transportowego Z Zastosowaniem Modelu Semi-Markowa. *Journal of KONBiN*, 33 (1), 187–196. doi: <https://doi.org/10.1515/jok-2015-0016>
14. Корчагин, В. А., Ризаева, Ю. Н. (2015). Управление транспортной системой на основе формирования транспортных потоков. Информационные

технологии и инновации на транспорте: матер. межд. науч. конф. Орел: ГУ УНПК, 9–11.

15. Redding, S. J., Turner, M. A. (2015). Transportation Costs and the Spatial Organization of Economic Activity. *Handbook of Regional and Urban Economics*, 1339–1398. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-59531-7.00020-x>

16. Нечаев, Г. И., Гуцало, Б. П., Слободянюк, М. Э. (2012). Задачи развития транспортной инфраструктуры востока Украины. *Вісник Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля*, 6 (177), 9–11.

17. Ha, M.-H., Yang, Z., Lam, J. S. L. (2019). Port performance in container transport logistics: A multi-stakeholder perspective. *Transport Policy*, 73, 25–40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.09.021>

18. Боровской, А. Е., Остапко, А. С. (2013). Моделирование транспортных процессов. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, ЭБС АСВ, 86.

19. Potapova, N. (2016). Territorial Aspect of Formation of Transport Complex. *Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Economic Sciences*, 1 (31), 189–194.

20. Pande, A., Wolshon, B. (2016). *Traffic engineering handbook*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119174738>

21. Barnard, Y., Risser, R., Krems, J. (2011). *The Safety of Intelligent Driver Support Systems. Design, Evaluation and Social Perspectives*. CRC Press, 210. doi: <https://doi.org/10.1201/9781315553146>

22. Black, J. (2018). *Urban transport planning: Theory and practice*. Routledge, 252. doi: <https://doi.org/10.4324/9781351068604>

23. Brown, R., Pehrson, S. (2019). *Group processes: Dynamics within and between groups*. John Wiley & Sons. doi: <https://doi.org/10.1002/9781118719244>

24. Тарарычкин, И. А., Слободянюк, М. Э., Нечаев, Г. И. (2016). *Методы структурного анализа и синтеза территориальных транспортных систем*. М., 184.

25. Peters, J. F., Wasilewski, P. (2012). Tolerance spaces: Origins, theoretical aspects and applications. *Information Sciences*, 195, 211–225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2012.01.023>